

令和 6 年 6 月 20 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H02226

研究課題名（和文）森林土壌微生物群集の機能と環境応答の広域スケール評価と空間スケール依存性の解明

研究課題名（英文）Evaluation of large-scale patterns and spatial dependence of forest soil microbial community function and its response environmental changes

研究代表者

中村 誠宏（Nakamura, Masahiro）

北海道大学・北方生物圏フィールド科学センター・教授

研究者番号：80545624

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、日本全国の天然林・人工林の土壌を対象に、1）土壌微生物群集の分解能性の広域パターンを解明すること、2）メソコズム実験で条件（豪雨、乾燥、温暖化）を操作して、気候変動への環境応答の広域パターンと、3）これら機能と環境応答への人工林化の影響を解明することである。その結果、どちらの森林タイプも、環境要因の標高と多機能性に関係が見られ、土壌理化学性の水分含量とpHに関係が見られた。天然林の降水量変化処理の影響は土壌粒度と関係が見られたが、人工林では関係は見られなかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来の研究では一つの地域に留まっていたため、結果を一般化することが難しい。広域スケールのネットワーク研究は、日本各地の複数サイトにて共通手法の調査を実施するため、より正確な評価ができ、一般化に繋がられる。最新の測定技術（マイクロプレート（Eco Plate）測定）で分解の多機能性を測定することで、群集の多機能性と冗長性の関係を評価できる。本研究は気候変動に対する緩和・適応策の立案に貢献するものである。

研究成果の概要（英文）：The objective of our study is to understand 1) the regional-scale patterns of multifunctionality (decomposition) of soil microbial communities in natural and planted forests across Japan. By manipulating conditions (heavy rainfall, aridity, and warming) in the mesocosm experiment, 2) regional-scale patterns of environmental response to climate change and 3) the effects of planted forest conversion on these functions and environmental responses are to be elucidated. Our results showed that for both forest types, elevation, moisture content, and pH were related to multifunctionality. The effect of heavy rain treatment in natural forests were related to soil particle size, but no relationship was found in planted forests.

研究分野：群集生態学

キーワード：気候変動 土壌微生物群集 生物多様性 生態系機能 空間スケール依存性

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 東アジアは地球上で最も高い生産性と生物多様性を維持しており、かつ人口も集中しているため、日本は気候変動や人間活動が生物多様性や生態系機能に与える影響がもっとも危惧されている地域の一つである。また、日本は自然災害の多い国である。気候変動は、温暖化だけでなく、集中豪雨など極端気象現象の頻度と規模を増大させている。このまま温暖化が進むと、今世紀末に台風は現在よりも 2 割程度大きくなることが予測されている。さらに、日本の森林の約 4 割はスギ・ヒノキの人工林が占めており、地上部の樹種の多様性が極めて低いため、地下部に供給されるリターの化学的・物理的多様性が低下し、土壤微生物群集の多様性が低下する可能性がある。そのため、人工林化は気候変動に対する森林生態系の感受性をより敏感なものにしていくかもしれない。

(2) 森林生態系の有機物の分解において、土壤微生物は重要な役割を持っている。土壤微生物は世代時間が短いため、多様性と機能の関係をみるのに最適な群集である。生物多様性は生態系機能に正の効果をもたらすことが指摘されている。しかし、実際には土壤微生物群集の種の多様性が増加するに伴い、分解が増加することもあれば、変化しなかったり、減少することもある。一方、機能群の多様性と生態系プロセスの関係は明確な正の相関が見られる。これは機能への貢献度が似ている種が多く含まれている(機能的冗長性)からかもしれないが、実証の結果は十分に整理されてはいなく、理論と実証が一致しない。そこで、種の多様性と機能群の多様性の繋がりを考慮して、多様性と機能の関係性の詳細なメカニズムを解明する必要がある。

(3) 機能的多様性には、機能に影響する形質の多様性を示す「効果多様性」と環境変動や攪乱への種の応答の多様性を示す「応答多様性」の 2 つが含まれている。その中で環境変動(気候変動、人間活動)に対する群集の応答(感受性)を考える場合、「応答多様性」に注目することが重要である。群集内に環境応答の異なる種を多く含んでいたならば、何らかの攪乱が生じても、群集内の全ての種の個体数や機能が減少することなく、攪乱後も機能は維持されることが予測されるからである。

(4) これら機能や環境応答の一般性のある評価のためには、広域スケールの調査による情報が必要である。ある局所の土壤微生物群集の温暖化などの環境変動に対する応答は研究されているが、応答が生態系により異なることも示されている。土壤微生物の群集構造は緯度によって変化する生物的(樹木の多様性、バイオマス、植物形質など)・非生物的要因(気温、降水量など)により決まるため、この緯度による群集構造の違いが応答に影響を与えていた可能性がある。群集に関する機能と環境応答への環境要因(生物的・非生物的要因)の影響は、直接効果だけでなく、土壤微生物の群集構造(多様性)の変化を介した間接効果の 2 つのプロセスが考えられる。機能と環境応答の広域パターンの解明には、緯度の変化に伴うこの両方のプロセスを考慮する必要がある。

(5) 上記のような広域スケールの生態系の変化を理解するには、日本各地に散らばる複数の森林観測サイトをネットワーク化して、共通した調査手法や野外実験を多地点で行うことが有効である。このような取り組みの一つが長期生態学研究(Long Term Ecological Research; LTER) ネットワークである。日本国内ネットワークとして JaLTER がある。研究代表者(中村)は JaLTER 科学委員会の一員として、土壤多機能測定ネットワーク研究への参加を呼びかけ、全国 69 の森林サイトから協力を得た。複数の森林サイトを繋げるネットワーク研究は広域スケールの現象を捉えることを可能にする強力なアプローチである。

2. 研究の目的

(1) 森林の土壤微生物に着目し、土壤微生物群集の多様性と機能の关系到広域パターンはあるのか?

(2) 土壤微生物群集は気候変動に対する環境応答(感受性)に広域パターンはあるのか?

(3) これら機能や環境応答は人工林化によりどのような影響を受けるのか? を検討した。

3. 研究の方法

(1) 多様性と機能の関係性の広域パターンの解明: 土壤微生物群集の多様性と機能(分解能)の広域パターンを解明した。プロジェクト参加に応えた全国の天然林と人工林のサイトからの土壌は送付してもらった。気候帯は亜寒帯から亜熱帯に及んでいる。土壌の DNA 解析(DNA バーコーディング)から、土壤微生物(細菌・真菌)の「種の多様性」を定量化し、さらに予測メタゲノムにより「機能遺伝子群の多様性」を評価する。マイクロプレート(Eco Plate)の培養実験から、複数種類の有機炭素基質に対する土壤微生物分解能(多機能性)を測定して、「機能群の多様性」を定量化した。土壌理化学性(炭素、窒素、CN 比、水分含量、pH)を測定した。環境

要因（緯度、標高、降水量、気温）と土壤理化学性（炭素、窒素、CN比、水分含量、pH）が土壤微生物群集の多機能性に与える影響に関して解析した。

（2）感受性（環境応答）の広域パターンの解明：日本全国の気候の異なる地域である北海道（雨龍、苫小牧）、関東（小川、秩父）、九州（綾、田野）から2森林サイトずつの土壤を用いて、インキュベーター内の条件を操作したメソコズム実験から、環境変動に対する土壤微生物群集の環境応答（感受性）の広域パターンを解明する。気候変動（集中豪雨、温暖化）を想定した条件として、降水量（乾燥化、豪雨、対照の3段階）と温度（5℃上昇、対照の2段階）を操作する。土壤のDNA解析から、「種の応答多様性」と「機能遺伝子群の応答多様性」を評価する。マイクロプレート（Eco Plate）の培養実験から、「機能群の応答多様性」を評価する。環境勾配パターンや地域性の解明を目指す。環境要因（気候・土壤要因）との関係を解析した。

（3）機能と環境応答への人工林化の影響の解明：機能と環境応答への人工林化の影響を広域スケールで評価する。協力森林サイトの近くの人工林からも土壤を採取する。上記と同様の手法で人工林の土壤微生物群集の機能と環境応答を測定して、天然林と人工林の比較から、人工林化が気候変動に対する土壤微生物群集の感受性（環境応答）をより敏感にしているのかを検証する。

4. 研究成果

（1）日本全国の天然林の33サイト（77プロット）から採集された土壤を用いて、14日間のエコプレートの培養実験から、31種類の有機炭素基質に対する天然林の土壤微生物群集の機能（分解能）を測定して、広域パターンを解析した。主座標分析（PCoA）の結果、第一軸の貢献度が55.6%で、固有ベクトルが全て正であるため、第一軸の値を分解の多機能性とした。環境要因（緯度、標高、降水量、気温）・土壤理化学性（炭素、窒素、CN比、水分含量、pH）と多機能性の回帰分析を実施した結果、多機能性は環境要因の標高と降水量の間に負の関係が見られたが、気温との間には正の関係が見られた。一方、多機能性は土壤理化学性の水分含量、窒素、炭素との間に負の関係が見られたが、pHの間には正の関係が見られた（Nakamura et al. 2021）。天然林土壤のDNA分析は終了したが、土壤微生物群集の多様性と機能の広域パターンに関しては解析中である。

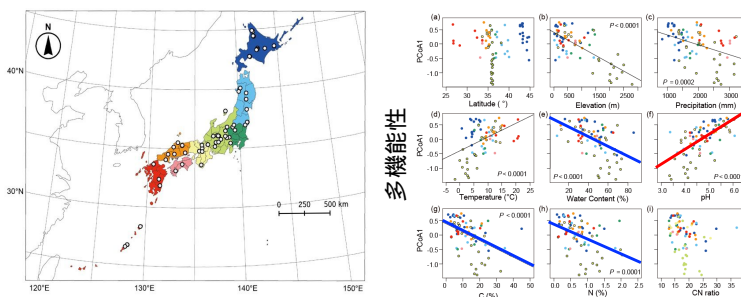


図1日本全国の土壤を採集した天然林の位置と土壤微生物群集の多機能性と環境要因・土壤理化学性との関係

（2）日本全国の人工林の74サイト（114プロット）から採集された土壤を用いて、14日間のエコプレートの培養実験から、31種類の有機炭素基質に対する天然林の土壤微生物群集の機能（分解能）を測定し、広域パターンを解析した。主座標分析（PCoA）の結果、第一軸の貢献度が36.5%で、固有ベクトルが全て正であるため、第一軸の値を分解の多機能性と考えた。環境要因・土壤理化学性と多機能性の回帰分析を実施した結果、多機能性は環境要因の標高との間に負の関係が見られたが、緯度との間には正の関係が見られた。一方、多機能性は土壤理化学性のpHとの間には正の関係が見られた。人工林土壤のDNA分析からの広域パターンに関しては解析中である。

（3）気候の異なる北海道、関東、九州から採取した天然林・人工林土壤を用いて、降水量変化と温暖化の処理を施したメソコズム実験を行った。土壤微生物群集の多機能性に対する降水量変化の処理の影響は天然林も人工林もサイトによって異なった一方、温暖化は天然林でのみ一部のサイトで負の影響が見られた。天然林も人工林もすべてのサイトで降水量変化と温暖化の処理の非相加的効果は見られなかった。降水量変化と温暖化の処理の効果量と環境条件（気候・土壤要因）の関係を単回帰で解析した結果、天然林では降水量変化の影響の大きさは土壤粒度と関係が見られるのに対して、人工林ではどの環境条件とも関係は見られなかった。人工林化が気候変動に対する土壤微生物群集の感受性をより敏感にすることを支持する結果ではなかった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件／うち国際共著 3件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Nakamura Masahiro et al.	4. 巻 37
2. 論文標題 Evaluating the soil microbe community level physiological profile using EcoPlate and soil properties at 33 forest sites across Japan	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Ecological Research	6. 最初と最後の頁 432 ~ 445
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1111/1440-1703.12293	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Cheng Wan-Hsuan, Hsieh Chih-hao, Chang Chun-Wei, Shiah Fuh-Kwo, Miki Takeshi	4. 巻 98
2. 論文標題 New index of functional specificity to predict the redundancy of ecosystem functions in microbial communities	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 FEMS Microbiology Ecology	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/femsec/fiac058	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Matsui Kazuaki, Miki Takeshi	4. 巻 11
2. 論文標題 Microbial community composition and function in an urban waterway with combined sewer overflows before and after implementation of a stormwater storage pipe	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 PeerJ	6. 最初と最後の頁 e14684 ~ e14684
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7717/peerj.14684	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Tatsumi Chikae, Taniguchi Takeshi, Du Sheng, Chen Qiuwen, Yamanaka Norikazu, Otsuki Kyoichi, Tateno Ryunosuke	4. 巻 110
2. 論文標題 Differences in the short-term responses of soil nitrogen and microbial dynamics to soil moisture variation in two adjacent dryland forests	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 European Journal of Soil Biology	6. 最初と最後の頁 103394 ~ 103394
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ejsobi.2022.103394	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Yokobe Tomohiro, Hyodo Fujio, Tateno Ryunosuke, Tokuchi Naoko	4. 巻 161
2. 論文標題 Soil mineral fraction influences the bacterial abundance: evidence from a mineral and plant materials incubation study	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Biogeochemistry	6. 最初と最後の頁 273 ~ 287
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10533-022-00978-w	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yokobe Tomohiro, Tokuchi Naoko, Hyodo Fujio, Tateno Ryunosuke, Hiura Tsutom	4. 巻 177
2. 論文標題 Response of microorganisms to a 5-year large-scale nitrogen loading in immature volcanic ash soil in an oak-dominated forest	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Applied Soil Ecology	6. 最初と最後の頁 104537 ~ 104537
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.apsoil.2022.104537	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nakayama Masataka, Imamura Shihomi, Tatsumi Chikae, Taniguchi Takeshi, Tateno Ryunosuke	4. 巻 155
2. 論文標題 Microbial functions and soil nitrogen mineralisation processes in the soil of a cool temperate forest in northern Japan	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Biogeochemistry	6. 最初と最後の頁 359 ~ 379
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10533-021-00830-7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yoshikawa Tetsuro, Nakamura Masahiro, Hiura Tsutom et al.	4. 巻 -
2. 論文標題 Forest monitoring data of 45 plots across the Japanese archipelago during 1980-2021	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Ecological Research	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/1440-1703.12457	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nakayama Masataka, Tateno Ryunosuke	4. 巻 -
2. 論文標題 Shift in the rhizosphere microbial communities between growing- and low-temperature dormant seasons in a northern hardwood forest	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Plant and Soil	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11104-023-06391-y	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tatsumi Chikae, Taniguchi Takeshi, Hyodo Fujio, Du Sheng, Yamanaka Norikazu, Tateno Ryunosuke	4. 巻 165
2. 論文標題 Mycorrhizal type affects forest nitrogen availability, independent of organic matter quality	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Biogeochemistry	6. 最初と最後の頁 327 ~ 340
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10533-023-01087-y	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計8件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 中山 理智、今村 志帆美、谷口 武士、舘野 隆之輔
2. 発表標題 北海道研究林の天然林・人工林における土壤微生物群集
3. 学会等名 生物地球化学研究会現地セッション
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中村誠宏、日浦勉、柴田英昭、菅原悠斗、舘野隆之輔、三木健
2. 発表標題 森林土壤微生物群集の地域スケールでの多機能性と環境応答性
3. 学会等名 第70回 日本生態学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Masahiro Nakamura, Chisato terada, Masae Ishihara, Tanaka Kenta, Tetsuro Yoshikawa, Tsutom Hiura
2. 発表標題 Site-network survey of soil microbe community-level physiological profile using EcoPlate across Japan.
3. 学会等名 13th International long-term Ecological Research-East Asia-Pacific Regional Network Regional Conference (2021 ILTER-EAP) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Chikae Tatsumi, Takeshi Taniguchi, Sheng Du, Norikazu Yamanaka, Ryunosuke Tateno
2. 発表標題 Relationship between forest mycorrhizal type and nitrogen-cycling functions of soil microbial communities: Implications from the rhizosphere scale to the ecosystem scale
3. 学会等名 2022 Annual Meeting of the Ecological Society of America (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masahiro Nakamura
2. 発表標題 Response of canopy herbivory in mature oak and birch trees to experimental soil warming
3. 学会等名 EAFES10 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中村誠宏
2. 発表標題 森林土壌微生物群集の地域スケールでの多機能性と環境応答
3. 学会等名 北海道大学低温科学研究所・共同利用・共同研究拠点・研究集会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Wan-Hsuan Cheng, Chih-hao Hsieh, Chun-Wei Chang, Fuh-Kwo Shiah, Takeshi Miki
2. 発表標題 New index of functional specificity to predict the redundancy of ecosystem functions in microbial communities.
3. 学会等名 第71回 日本生態学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 三木健
2. 発表標題 細菌多様性の時空間分布と物質循環のリンクの解明に対して、群集生態学理論は役に立つのか立たないのか？
3. 学会等名 日本海洋学会秋季大会（招待講演）
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 小池 孝良、塩尻 かおり、中村 誠宏、鎌田 直人	4. 発行年 2023年
2. 出版社 共立出版	5. 総ページ数 280
3. 書名 木本植物の被食防衛	

1. 著者名 小池孝良、中村誠宏、宮本敏澄	4. 発行年 2021年
2. 出版社 農山漁村文化協会	5. 総ページ数 192
3. 書名 森林保護学の基礎	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	三木 健 (Takeshi Miki) (00815508)	龍谷大学・先端理工学部・教授 (34316)	
研究分担者	舘野 隆之輔 (Ryunosuke Tateno) (60390712)	京都大学・フィールド科学教育研究センター・教授 (14301)	
研究分担者	日浦 勉 (Hiura Tsutom) (70250496)	東京大学・大学院農学生命科学研究科(農学部)・教授 (12601)	
研究分担者	柴田 英昭 (Shibata Hideaki) (70281798)	北海道大学・北方生物圏フィールド科学センター・教授 (10101)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関